

⑯ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑯ Patentschrift
⑯ DE 3534059 C1

⑯ Int. Cl. 5:
H01Q 17/00

F 41 H 3/02
B 32 B 7/02
B 32 B 27/04

D5

⑯ Aktenzeichen: P 35 34 059.2-35
⑯ Anmeldetag: 25. 9. 85
⑯ Offenlegungstag: —
⑯ Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 17. 5. 90

Erteilt nach § 54 PatG in der ab 1. 1. 81 geltenden Fassung

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑯ Patentinhaber:

Dornier GmbH, 7990 Friedrichshafen, DE

⑯ Erfinder:

Roth, Siegfried, Dipl.-Ing. (FH), 7777 Salem, DE;
Schneider, Horst, Dipl.-Ing. (FH), 7758 Meersburg,
DE; Wulbrand, Wilhelm, Dipl.-Phys. Dr., 7990
Friedrichshafen, DE; Engelhardt, Wolfgang, 5600
Wuppertal, DE

⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE-AS 12 80 997
DE 33 11 001 A1
DE 33 07 066 A1
DE 31 17 245 A1
US 25 99 944
JP 52-44 542

Meyer E. u. Pottel R. in »Fortschritte der
Hochfrequenztechnik«, 1960, Bd.5, S.26-71;

⑯ Faserverbundwerkstoff

Der Faserverbundwerkstoff für tragende Strukturen zur Absorption elektromagnetischer Wellen besteht im Aufbau aus wenigstens drei in ihren elektromagnetischen Stoffkonstanten zu unterscheidenden Schichten (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), wobei für die Schichten (2 bis 9) eine oder mehrere Faserlagen (10, 11, 12, 13; 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21; 23, 24) verwendet werden. Die Faserlagen weisen schichtweise abwechselnd eine hohe oder niedrige elektrische Leitfähigkeit auf, derart, daß die elektromagnetischen Stoffkonstanten der aus den Faserlagen (13 bis 21 und 23, 24) und Binder bestehenden Schichten (2 bis 9) und die Schichtdicken so aufeinander abgestimmt sind, daß die Reflexionsdämpfung integral in einem vorgegebenen Frequenzbereich maximiert ist.

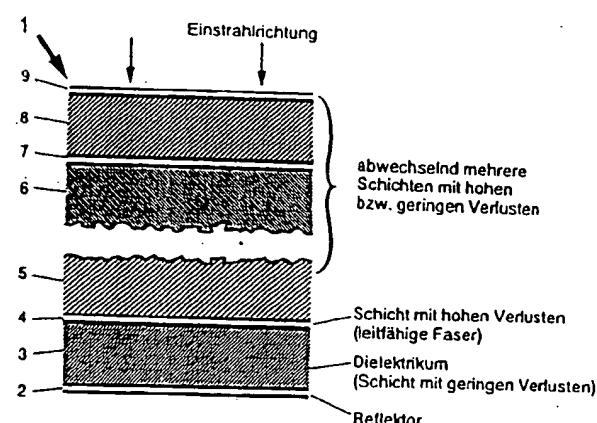


Fig. 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen Faserverbundwerkstoff für tragende Strukturen zur Absorption elektromagnetischer Wellen.

Faserverbundwerkstoffe für tragende Strukturen sind gekennzeichnet durch eine hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit, welche im wesentlichen durch die dazu verwendete Faser und den Faservolumenanteil bestimmt sind.

Die meist aus einem organischen Harz bestehende Matrix verbindet die einzelnen Faserlagen zu einem Verbundwerkstoff. An die Matrix werden hohe chemische und mechanische Anforderungen gestellt. Im Flugzeugbau werden vorwiegend Faserverbundwerkstoffe eingesetzt, welche als vorimprägnierte Fasergelege — sogenannte Prepregs — aufgeschichtet und in Autoklavverfahren gehärtet sind.

Bei derartigen aus Metall- und Faserverbundwerkstoffen bestehenden Strukturen werden zur Absorption elektromagnetischer Wellen spezielle Folien, Schichten oder Matten z.B. durch Kleben zusätzlich aufgebracht. Nachteilig sind dabei das zusätzliche Gewicht, das hohe Risiko bei der Haftung und Beständigkeit, z.B. Ausfransen an den Kanten der Matten oder Platten, die aerodynamische Verschlechterung aufgrund der erhöhten Rauigkeit der Oberfläche, der Stoßstellen der zusammenstoßenden Matten oder Platten und der höhere Wartungsaufwand durch Prüfung der Schichten auf Ablösung.

Aus der DE-OS 31 17 245 ist ein Verfahren zur Tarnung beliebiger, vorwiegend metallischer Objekte gegen Radarentdeckung sowie zum Schutz beliebiger Objekte gegenüber elektromagnetischen Feldern bekannt, bei welchem die Objekte auf ihrer Oberfläche ganz oder teilweise eine metallisierte textile Polware aufweisen, von der diejenige Seite, die den Pol besitzt, in Richtung zur einfallenden Strahlung zu liegen kommt. Nachteilig ist hier, daß die Polware eine auf eine Objektfläche, z.B. durch Kleben, zusätzlich aufgebrachte Schicht ist und somit ein zusätzliches Gewicht und gleichzeitig keine tragende Funktion aufweist. Polware ist wegen ihrer geringen Festigkeit auf Beanspruchung, z.B. gegen Regenerosion, und wegen der aerodynamischen Oberflächenqualität zum Aufbringen auf Außenflächen von Flugzeugen nicht geeignet.

Ein aus der DE-OS 33 11 001 bekannter Absorber für elektromagnetische Wellen verwendet dazu im wesentlichen aus Siliziumcarbit (Si-C) bestehende Fasern, die als Faserverbundwerkstoff geeignet sind. Der darin beschriebene Aufbau besteht aus Si-C-Gewebe bzw. einem Harz-Gewebeverbund, wobei die Fasern eine geeignete Leitfähigkeit aufweisen müssen und ein metallischer Reflektor als Abschluß (Rückseite) verwendet wird. Der Bauart dieses Absorbers liegt die Funktionsweise des $\lambda/4$ -Schicht-Absorbers zugrunde. Die Dicke der homogenen Absorberschicht ohne den reflektierenden Abschluß beträgt dabei ein Viertel der Resonanzwellenlänge, wenn von den Korrekturen abgesehen wird, die durch die elektrischen Verluste bedingt sind. Die hierbei vorgesehene Metallplatte als Reflektor stellt keinen natürlichen Bestandteil des Faserverbundes dar, was für eine tragende Struktur von Nachteil ist.

Bei einer aus der Literaturstelle JP-Kokai Nr. 52-44 542 bekannten Absorberanordnung ist auf der Vorderseite eines Induktors eine dünne Kohlenstoff-Faserschicht und auf der Rückseite eine Reflexionsschicht angeordnet. Auch hierbei hat die verwendete Kohlen-

stoff-Faserschicht keine tragende Funktion; sie dient lediglich zur Versteifung und als Temperaturschutz für den Induktor.

Eine aus der US-PS 25 99 944 bekannte Vorrichtung verwendet zur Absorption einer hochfrequenten elektromagnetischen Strahlung einen Behälter, dessen Wandung aus in Schichten verschiedener Dicke übereinander angeordneten unterschiedlichen Materialien wie Holz, Metall und einer textilen Leinwand besteht.

Hierbei ist der geschichtete Aufbau der Wand im Prinzip derart, daß die äußere Schicht aus einer Metallplatte, die mittlere aus Holz und die innere Schicht aus einer textilen und mit Graphit überzogenen Leinwand besteht. Dabei kann die Metallplatte zwischen zwei Holzschichten angeordnet sein. Eine tragende Struktur, wie sie im Flugzeugbau benötigt wird, ist auch hier nicht vorhanden.

Schließlich ist noch aus der DE-OS 33 07 066 ein mehrschichtiger Faserverbundwerkstoff für tragende Strukturen bekannt, bei dem die absorbierende Wirkung durch den Einsatz von Füllstoffen erzielt wird, deren Konzentration zu der Fläche hin zunimmt, die der bestrahlten Fläche abgewandt ist. Nachteilig ist hierbei, daß das Einbringen der Füllstoffe in den Faserverbundwerkstoff einen hohen Aufwand an Genauigkeit bei der Herstellung erfordert, weil bei Ungenauigkeiten der Einzelschichtdicke und bei Inhomogenitäten die vorgegebene Frequenzbandbreite und die Dämpfung negativ beeinflußt werden und somit der gewünschte Effekt der Absorption nur unzureichend erzielt wird. Hierbei wird das Prinzip des sogenannten inhomogenen Absorbers bei quasikontinuierlichem stofflichen Übergang verwirklicht (vergleiche z.B. Meyer E. und Pottel R. Fortschritte der Hochfrequenztechnik, Band 5, 1960).

Aufgabe der Erfindung ist, einen Faserverbundwerkstoff für tragende Strukturen so auszubilden, daß er einerseits die hierzu notwendigen Eigenschaften, wie ausgezeichnete mechanische, thermische und chemische Beständigkeit aufweist und andererseits zugleich so aufgebaut ist, daß er in einem vorgegebenen Frequenzbereich elektromagnetische Wellen bzw. Strahlung in einer Weise absorbiert, die entsprechenden herkömmlichen Absorbern zumindest gleichwertig ist.

Erfundungsgemäß sind zur Lösung der gestellten Aufgabe die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 vorgesehen. Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Bei gleicher Zielsetzung unterscheidet sich der erfundungsgemäße Absorber von den bekannten Absorbern (DE-OS 33 07 066 und DE-OS 33 11 001) in zweifacher Hinsicht. Zum einen liegt hier der Bauweise ein völlig anderes Absorptionsprinzip zugrunde und zum anderen wird hierbei auf den Einsatz von Füllstoffen ganz oder teilweise verzichtet. Die Absorberkonstruktion läßt sich schon allein mit Fasern und Gewebe in Verbindung mit als Matrix verwendeten Bindern verwirklichen, welche natürliche Bestandteile von Faserverbunden sind. Daraus ergibt sich der weitere Vorteil, daß bei der strukturellen Auslegung bezüglich der mechanischen Anforderungen (tragende Struktur) auf bekannte Kriterien zurückgegriffen werden kann.

Sofern dieser Vorteil nicht von besonderem Interesse ist, läßt sich die Bautiefe des Absorbers gegebenenfalls durch minimale Füllstoffanteile reduzieren.

Die erfundungsgemäße Bauart des Absorbers basiert auf dem Prinzip des Salisburg Screen (vergleiche Salisbury W. W. US-PS 25 99 944), welches auch als Prinzip des Folienabsorbers bekannt ist (vergleiche z.B. Meyer

E. und Pottel R. in Fortschritte der Hochfrequenztechnik, Band 5, 1960); jedoch werden die üblichen Auslegungskriterien bezüglich der Eigenschaften der sogenannten Folie und des Zwischenschichtdielektrikums bewußt modifiziert. Die Forderung nach geringer Folendiinne, Vernachlässigbarkeit von Polarisationsströmen in der Folienschicht und von Leistungsströmen im Dielektrikum wird hier nicht beibehalten. Diese Bedingungen sind zweckmäßig, wenn die für die Auslegung benötigten Parameter mit analytischen Mitteln bestimmt werden müssen. Der Einsatz elektronischer Rechenanlagen erlaubt es, auf die Einschränkungen zu verzichten und auf diese Weise Vorteile bezüglich Bandbreite und Bautiefe zu erzielen.

Bezüglich des Materials für das zu verwendende Gewebe wird erfahrungsgemäß keine Einschränkung vorgenommen. Insbesondere für den volumenmäßig unwe sentlichen Anteil, welcher die als "Folien" zu bezeichnenden Schichten ausmacht, ist zwar ein Si-C-Gewebe entsprechender Leitfähigkeit geeignet, jedoch ebenso gut eine C-Faser mit ausgewähltem Widerstand zu verwenden. Als reflektierende Abschlußschicht ist eine C-Faserschicht extrem hoher elektrischer Leitfähigkeit angemessen, deren Wellenwiderstand nahezu verschwindet. Eine Metallplatte, wie sie bekannte Absorber vorsehen, kann zwar ebenfalls die Anforderungen erfüllen, wird aber in der Regel den Anforderungen weniger genügen, da sie keinen natürlichen Bestandteil des Faserverbundes darstellt.

Folgend sind Ausführungsbeispiele beschrieben und durch Skizzen erläutert.

Es zeigt:

Fig. 1 einen aus acht unterschiedlichen Schichten gefertigten Faserverbundwerkstoff im Prinzip,

Fig. 2 einen Faserverbundwerkstoff aus drei Schichten und einer zusätzlichen Schutzschicht in detaillierter Darstellung.

In Fig. 1 ist der prinzipielle Aufbau eines Faserverbundwerkstoffes 1 der erfahrungsgemäßen Art dargestellt. Der Faserverbundwerkstoff besteht hier exemplarisch aus acht voneinander zu unterscheidenden Schichten 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Davon dient die untere, der einfallenden elektromagnetischen Strahlung abgewandte Schicht 2 als Reflektor, der kein ideales Reflexionsvermögen besitzen muß. Auf diese Schicht 2, die unter Verwendung einer extrem hochleitfähigen Faser gefertigt wird, folgt ein sogenanntes Zwischenschichtdielektrikum 3, für das hochohmige bzw. praktisch nichtleitende Fasern verwendet werden. Die folgende als modifizierte Folie zu bezeichnende Schicht 4 weist relativ hohe Verluste auf. Sie wird mit Fasern gefertigt, deren Leitfähigkeit gegenüber denen im Zwischenschichtdielektrikum 3 hohe Werte annimmt, jedoch nach oben dadurch beschränkt ist, daß die Schicht 4 gegenüber der einfallenden Strahlung teildurchlässig sein muß. Es folgen abwechselnd weitere Schichten 5, 6, 7, 8, 9 der beschriebenen Art 3 und 4, wobei als oberste Schicht beide Formen der Ausführung möglich sind. Die Schichten 4, 7, 9, die relativ hohe elektrische Verluste aufweisen, können in ihrer Ausführung bezüglich der elektromagnetischen Stoffkonstanten und Dicken untereinander verschieden sein. Entsprechendes gilt für die Zwischenschichtdielektrika 3, 5, 6, 8.

Die Fig. 2 zeigt einen Aufbau des in Fig. 1 dargestellten allgemeinen Prinzips in einfacherster Ausführung, wobei die einzelnen Schichten detaillierter beschrieben sind. Die Schicht 2 besteht z.B. aus mehreren Lagen CFK 10, 11, 12, 13, wobei die Lage 13 als Reflektor dient

und die zusätzlichen Lagen 10, 11, 12 zur Anpassung an die Festigkeitsanforderungen benutzt werden. Der spezifische Widerstand für das Gewebe des Reflektors besitzt z.B. Werte von $\varphi \approx 10^{-6} \Omega \text{cm}$.

Auf die Schicht 2 folgt das Zwischenschichtdielektrikum 3, das z.B. aus einem Aramidfaserverbund (AFK) mit den Faserlagen 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 besteht. Wird z.B. eine Kevlarfaser verwendet, so ist die Schicht für die einfallenden Wellen transparent, das heißt praktisch verlustfrei. Kevlar weist ein geringes spezifisches Gewicht auf und bietet somit den Vorteil einer gewichtsgünstigen Lösung. Zur Reduktion der Bautiefe können, sofern notwendig, minimale Füllstoffanteile 22 eingebracht werden. Die obere Schicht 4 bzw. 9 kann z.B. aus zwei Lagen CF-Gewebe 23, 24 gefertigt werden, das einen spezifischen Widerstand von $\varphi \neq 20 \Omega \text{cm}$ besitzt, der damit klein ist gegenüber dem Widerstand der für die Zwischenschicht verwendeten Faser. Die so gefertigte Schicht weist bei dieser Ausführung einen nicht zu vernachlässigenden Realteil der komplexen Dielektrizitätskonstanten auf, das heißt, daß bei der Auslegung die auftretenden Polarisationsströme zu berücksichtigen sind. Außerdem ist die Dicke der Schicht nicht als klein gegen den reziproken Wert aus dem Betrag der komplexen Wellenzahl anzusehen. Somit entspricht die Bauweise nicht den üblichen Kriterien eines Folienabsorbers, bei dem anstelle dieser Schicht eine metallische Folie mit einem Flächenwiderstand verwendet wird, der dem Freifeldwellenwiderstand des Vakuums von 377Ω gleicht. Abgesehen von den mechanischen Vorteilen erwies sich diese Bauweise auch für die Bandbreite und Bautiefe als vorteilhaft.

Die Schicht 9 kann speziell im Regenerationsbereich mit einer Schutzschicht 25, 26 aus thermoplastischem Material überzogen werden, wie z.B. einer dünnen PE-EK-Lage, die bei der Auslegung zu berücksichtigen ist und keine Nachteile bezüglich der Reflexionsdämpfung bewirkt.

Die Wirkung des Faserverbundwerkstoffes als Absorber basiert auf einem Aufbau in einer Form, die eine Modifikation des sogenannten Folienabsorbers darstellt. Für den Faserverbundwerkstoff bedeutet das in einfachster Ausführung eine Struktur aus drei in ihren elektromagnetischen Stoffkonstanten zu unterscheidenden Schichten: eine hochleitfähige Faserkunststoff-(FK)-Schicht als Reflektor, eine relativ transparente Zwischenschicht aus hochohmigen Fasern, wie z.B. Kevlar, und eine Folienschicht, die z.B. mit einer geeignet präparierten C-Faser, einer metallisierten Faser oder einer SiC-Faser gefertigt wird. Anstelle der Kevlarfaser ist für die Zwischenschicht auch eine Glasfaser, eine Keramikfaser (Al_2O_3) und eine relativ hochohmige SiC-Faser verwendbar.

Durch den Einsatz thermoplastischer Matrices wird die Schlag-, Stoß- und Reißempfindlichkeit eines Absorbers erhöht. Durch die Auswahl geeigneter Fasern mit entsprechend thermischen Dehnkoeffizienten entstehen bei Erwärmung in den einzelnen Schichten gleiche thermische Dehnungen, wodurch die inneren Spannungen gering bleiben.

Patentansprüche

1. Faserverbundwerkstoff für tragende Strukturen zur Absorption elektromagnetischer Wellen, dadurch gekennzeichnet, daß sein Aufbau aus wenigstens drei in ihren elektromagnetischen Stoffkonstanten zu unterscheidenden Schichten (2, 3, 4,

5, 6, 7, 8, 9) besteht, wobei für die Schichten (2 bis 9) eine oder mehrere Faserlagen (10, 11, 12, 13; 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21; 23, 24) verwendet werden und die Faserlagen schichtweise abwechselnd eine hohe oder niedrige elektrische Leitfähigkeit aufweisen, 5 derart, daß die elektromagnetischen Stoffkonstanten der aus den Faserlagen (13 bis 21 und 23, 24) und Binder bestehenden Schichten (2 bis 9) und die Schichtdicken so aufeinander abgestimmt sind, daß die Reflexionsdämpfung integral in einem vorgegebenen Frequenzbereich maximiert ist. 10

2. Faserverbundwerkstoff nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die letzte für die Reflexionsdämpfung wirksame Schicht (2) ein hohes Reflexionsvermögen aufweist. 15

3. Faserverbundwerkstoff nach den Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß für die Schicht (2) eine elektrisch hochleitfähige Faser (z.B. C-Faser) verwendet wird.

4. Faserverbundwerkstoff nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Realteil der Dielektrizitätskonstanten in den Zwischenschichtdielektrika, das heißt in den Schichten (3, 5, 6, 8), für die Fasern mit geringer elektrischer Leitfähigkeit verwendet werden, durch minimale Anteile von Füllstoffen (22) vergrößert wird. 20

5. Faserverbundwerkstoff nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Anteil der Füllstoffe (22) in den einzelnen Schichten (3, 5, 6, 8) unterschiedlich sein kann. 30

6. Faserverbundwerkstoff nach den Ansprüchen 1, 4 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten (3, 5, 6, 8) für die Fasern mit geringer elektrischer Leitfähigkeit verwendet werden, nicht zu vernachlässigende Leitungsströme aufweisen können. 35

7. Faserverbundwerkstoff nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten (2, 4, 7, 9), für die Fasern mit hoher elektrischer Leitfähigkeit verwendet werden, nicht zu vernachlässigende Polarisationsströme aufweisen können. 40

8. Faserverbundwerkstoff nach den Ansprüchen 1 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten (4, 7, 9) Dicken aufweisen, derart, daß die Produkte aus jeweiliger Dicke und dem jeweiligen Betrag der komplexen Wellenzahl gegen 1 nicht klein sein müssen. 45

9. Faserverbundwerkstoff nach den Ansprüchen 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß als Matrix außer duroplastischen Harzen auch thermoplastische Werkstoffe wie Polyether-Ether-Keton (PEEK), 50 Polyetherimid (PEI) oder Polysulfon verwendet werden.

10. Faserverbundwerkstoff nach den Ansprüchen 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die erste, den einfallenden Wellen zugekehrte Schicht (4, 7 oder 9, je nach Schichtzahl) mit einer Erosionsschutzschicht (26), z.B. PEEK, PET oder Polyurethanlack überzogen ist. 55

— Leerseite —

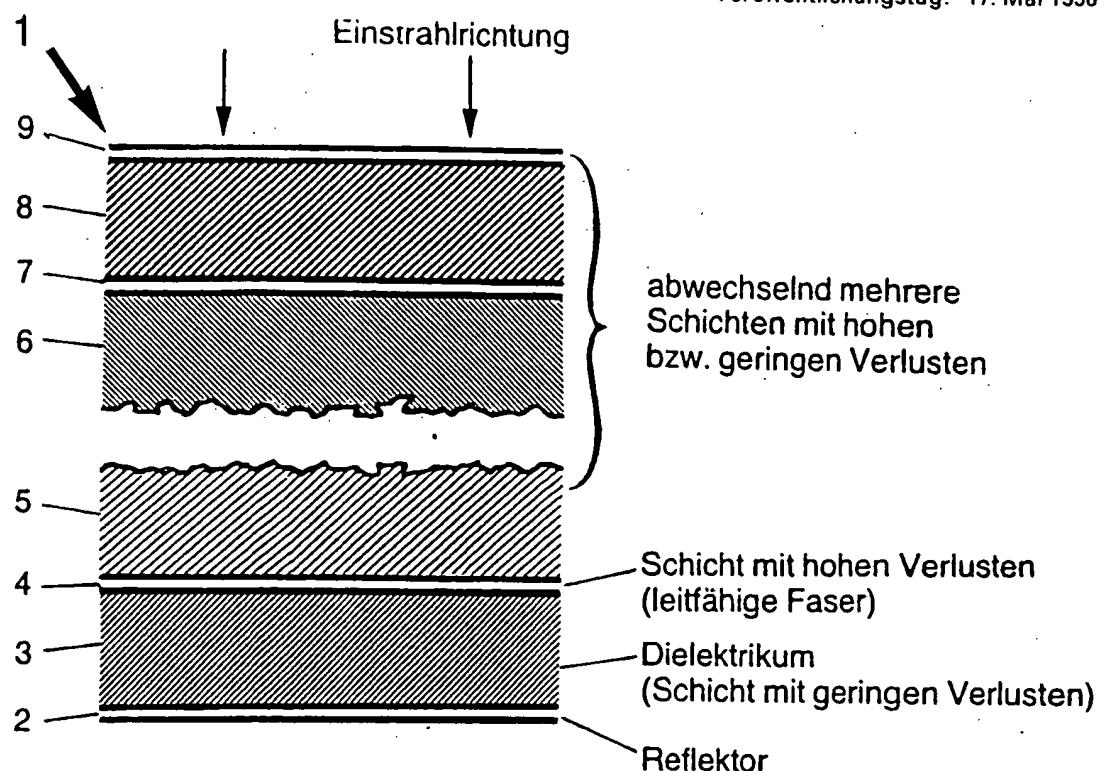


Fig. 1

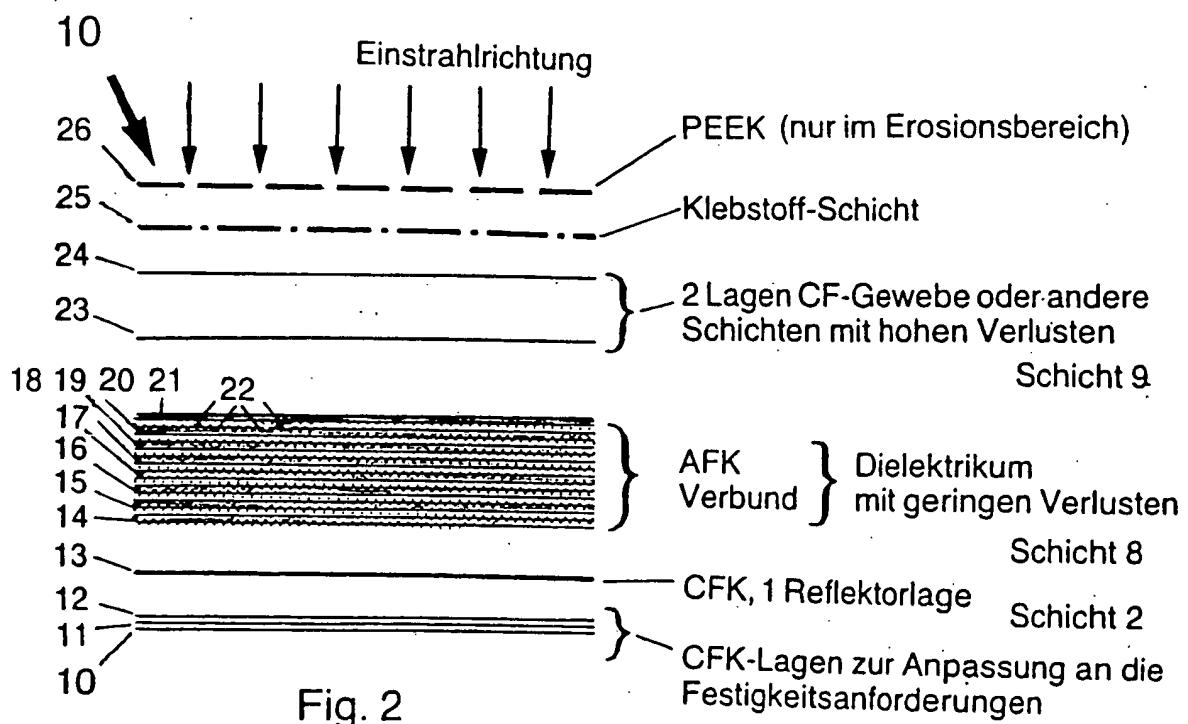


Fig. 2